

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.048

## ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФАРФОРОВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

А.В. Голенищев-Кутузов, В.А. Голенищев-Кутузов, Д.А. Иванов, Г.Д. Марданов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
E-mail: alex.kutuzov@mail.ru

**Резюме:** Выполнено обследование технического состояния фарфоровых высоковольтных изоляторов (ФВИ) типа ИОС 110/400 на двух подстанциях ОАО «Сетевая компания «Казанские электрические сети», с использованием ранее разработанного метода двухканального дистанционного контроля. По результатам измерения набора характеристик частичных разрядов (ЧР) и их компьютерного анализа была произведена диагностика технического состояния 38 ФВИ с разделением на четыре группы: полностью работоспособных; работоспособных на данный момент времени; ограниченно работоспособных и требующих замены при последующих регламентных обследованиях; полностью неработоспособных, требующих немедленной замены.

**Ключевые слова:** дистанционная диагностика, высоковольтные изоляторы, частичные разряды, электромагнитные и акустические датчики, дефекты.

**DOI:**10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-99-107

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 18-08-00203А.

## REMOTE CONTROL OF THE TECHNICAL CONDITION OF PORCELAIN HIGH VOLTAGE INSULATORS

A.V. Golenishev-Kutuzov, V.A. Golenishev-Kutuzov, D.A. Ivanov, G.D. Mardanov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
E-mail: alex.kutuzov@mail.ru

**Abstract:** A survey of the technical condition of porcelain high-voltage insulators (IEE 110/400 type) was carried out at two substations of JSC «Grid Company «Kazan electric networks», using

*the previously developed method of two-channel remote control. Based on the measurement of a set of partial discharge characteristics (PD) and their computer analysis, the technical condition of 38 PVI was diagnosed with the division into four groups; Fully operational; Workable at the given time; Limited working capacity and requiring replacement during subsequent routine inspections; Completely inoperative, requiring immediate replacement.*

**Keywords:** *remote diagnostics, high-voltage insulators, partial discharges, electromagnetic and acoustic sensors, defects.*

**Acknowledgements:** *This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant 18-08-00203A.*

### **Введение**

В опорных высоковольтных изоляторах (ВИ), в ходе длительной эксплуатации, за счет старения фарфора, влияния градиентов температуры, осадков, грозových разрядов или перенапряжения возможно возникновение первичных повреждений (дефектов), их дальнейшее разрастание, что может, в конечном итоге, приводить к разрушению изоляторов. К основным дефектам относятся поверхностные трещины и нарушения плотного контакта между электродами и диэлектрическим стержнем. Особенностью опорных ВИ является то обстоятельство, что они одновременно испытывают как электрическую, так и механическую нагрузку. Более того, контакты между стержнем и фланцами могут испытывать дополнительные механические напряжения вследствие градиентов температур между диэлектриком и металлом. До настоящего времени не разработаны какие-либо стандартизованные методы и соответствующие им устройства для контроля и диагностики технического состояния ВИ дистанционным способом без отключения рабочего напряжения [1–3], поскольку даже новые ГОСТы и стандарты касаются только стендовых испытаний с регулируемым источником высокого напряжения [4; 5]. В наибольшей степени это обстоятельство относится к более старым высоковольтным системам, имеющим в своем составе ФВИ со сроком работы более 20–30 лет [6].

Ранее на кафедре ПЭС КГЭУ были разработаны метод и устройство [7; 8], позволяющие дистанционно измерять характеристики ЧР и по ним определять степень работоспособности ВИ. Этот метод ранее успешно был опробован на серии полимерных ВИ типа ЛК 70/35 [7]. В данной работе сообщается о первом применении разработанного метода для дистанционного контроля технического состояния ФВИ, находящихся под рабочим напряжением.

### **Изоляторы. Методика измерений**

Всего было обследовано 38 ФВИ типа 110/400 на подстанциях «Западная» и «Водозабор». Особенностью этих подстанций является значительный разброс времени ввода ФВИ (от 1974 до 2012 года) и отсутствие каких-либо документированных данных об их состоянии на данный момент. Кроме того, ФВИ на подстанциях расположены на расстояниях не более 5 метров друг от друга, что затрудняло возможность подхода к ним ближе 5 метров. Номинальное напряжение составляло 110 кВ.

Измерения набора характеристик ЧР от каждого из изолятора выполнялись двумя выносными антеннами с усилителями электромагнитных (частота 540 МГц) и акустических (40 кГц) импульсных сигналов ЧР. Расстояние от датчиков до ФВИ составляло порядка 6 метров. Использование узконаправленных антенн позволяло различать сигналы ЧР от конкретных изоляторов. Фазовое рассогласование сигналов ЧР, за счет различия скоростей распространения акустических и электромагнитных волн, устранялось путем точного измерения расстояний с помощью лазерного дальномера. В дальнейшем изложении материала все

результаты измерений характеристик ЧР обоими датчиками приводятся в скорректированном виде, с учетом расстояний между дефектами и датчиками. Однако, в отличие от контактного стенового метода [4; 5], в котором используется измерение таких характеристик ЧР, как интенсивность, частота повторения и момент возникновения ЧР, измерение этих параметров дистанционным методом приводит к значительным погрешностям, зависящим от затухания сигналов, влияния климатических и внешних акустических и электромагнитных помех.

Поэтому нами, в соответствии с результатами предварительного изучения эффектов ЧР, было установлено, что наибольшей диагностической информативностью при дистанционном контроле являются (по степени значимости) такие параметры, как: изменение фазовых интервалов генерации ЧР ( $\Delta\varphi$ ), соответствующие наиболее мощным ЧР; их интенсивность ( $q_{\text{мощ}}$ ) и частота повторения ( $N_{\text{мощ}}$ ); распределение числа ЧР по интенсивности, в сравнении с бездефектными и полностью работоспособными изоляторами.

#### Результаты обследования изоляторов

С учетом ранее выполненного изучения основных дефектов в ФВИ и их влияния на характеристики ЧР [8], наше обследование позволило разделить их на 4 группы по степени дефектности, а, следовательно, и работоспособности. К первой группе относятся полностью работоспособные ФВИ с минимальной интенсивностью ( $q < 200$  пКл) и числа ( $N < 500$ ) ЧР, расположенных в фазовых интервалах вблизи  $90$  и  $270^{\circ}$ . Ко второй группе – условно работоспособные и не требующие замены ФВИ содержащие ЧР с  $q \leq 300$  пКл и  $N \leq 1000$  и  $\Delta\varphi$  в интервалах  $50-80^{\circ}$  и  $220-250^{\circ}$ . В третьей группе – ФВИ, сохраняющие работоспособность только в ограниченный интервал времени и требующие особого внимания и даже замены при ближайших регламентных обследованиях. Они отличаются резким, по сравнению с первыми двумя группами, увеличением интенсивности мощных ЧР до 2 нКл, числом в 2–5 раз и сдвигом  $\Delta\varphi$  интервалов к началу фазовых периодов. Предварительно, по общему техническому состоянию каждой из подстанций и визуальному осмотру ФВИ, не было обнаружено неработоспособных изоляторов, требующих немедленной замены и отнесенных к четвертой группе. Усредненные параметры характеристик ЧР для трёх групп представлены в таблице, а сами характеристики – на рис. 1–3. Было установлено значительное различие в распределении количества ЧР по интенсивностям. В бездефектных ФВИ большинство ЧР относятся к узкому интервалу интенсивности, и этот интервал значительно возрастает с ростом дефектности изоляторов.

Таблица

Параметры характеристик ЧР для трех групп ФВИ;  $\Delta\varphi$  – фазовые интервалы генерации ЧР;  $q$  – заряд;  $N$  – количество ЧР за полупериод, знаки max обозначают параметры ЧР с интенсивностью выше 100 пКл.

Параметры	Группа	1		2		3	
	методы	э-м	ак	э-м	ак	э-м	ак
	Фазы, град						
$\varphi/\Delta\varphi$	0–180	60–80	60–80	50–70	50–70	30–50	30–50
	180–360	240–260	240–260	230–250	220–240	210–240	210–240
$q$ , пКл	0–180	180	130	270–280	220–240	210–240	210–240
	180–360	220	230	240–250	260–280	650	680
$N$	0–180	500	400	800	950	2000	3000
	180–360	200	600	900	1000	2200	2900
$\varphi/\Delta\varphi_{\text{max}}$	0–180	0	0	0	0	40-60	40-60
	180–360	0	0	0	0	220-240	220-240
$q_{\text{max}}$	0–180	0	0	0	0	2 нКл	1,8 нКл
	180–360	0	0	0	0	2 нКл	1,8 нКл
$N_{\text{max}}$	0–180	0	0	0	0	100	100
	180–360	0	0	0	0	80	80

Установлено, что по параметрам ЧР большинство обследованных изоляторов относятся к первой (8 шт.) и второй (25 шт.) группам и только пять ФВИ — к третьей группе. В целом нужно констатировать, что предложенный набор характеристик ЧР позволяет достаточно точно разделять работоспособные (1 и 2-я группы) от ограниченно работоспособных изоляторов (3-я группа), поскольку, если параметры ЧР первых двух групп различаются на 50–80%, то различие их от третьей группы превышало интенсивность мощных ЧР в 5–8 раз.

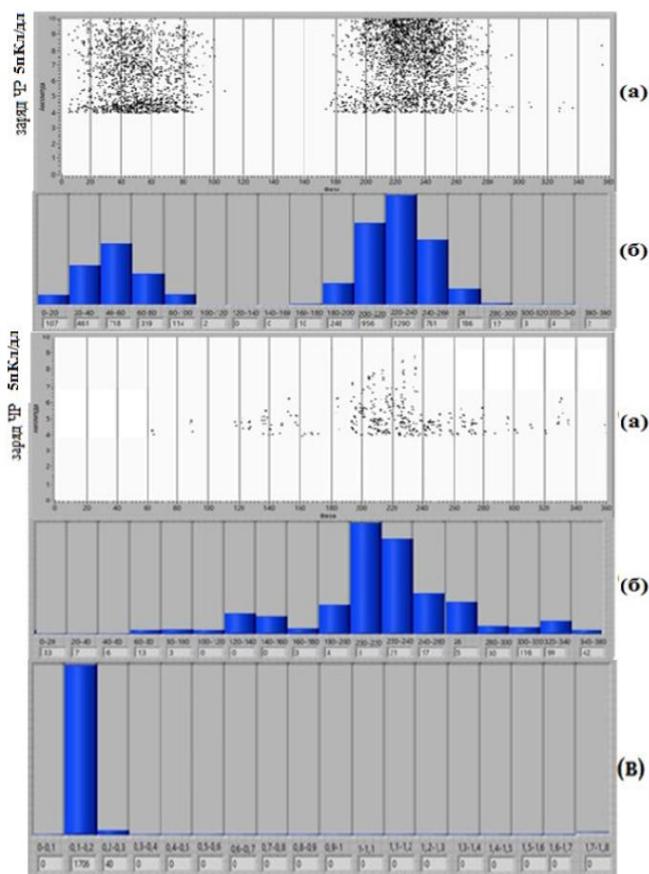


Рис 1. Характеристики ЧР для работоспособного бездефектного изолятора № 3: амплитудно-фазовые характеристики и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; (в) — распределение количества ( $N$ ) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком, в зависимости от интенсивности

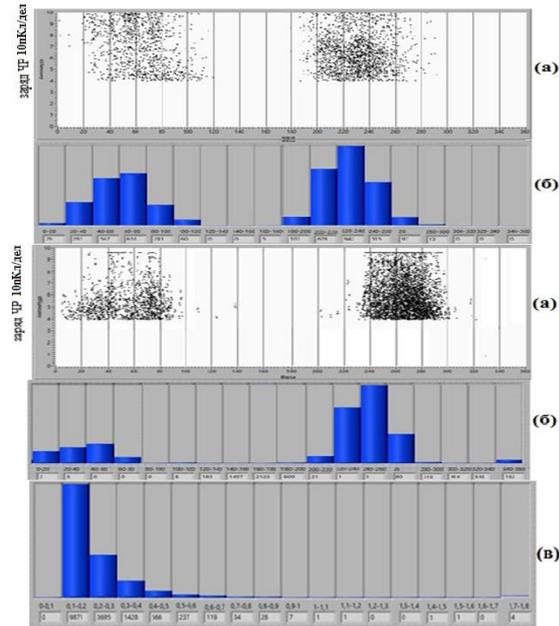


Рис. 2. Характеристики ЧР для работоспособного, мало дефектного изолятора № 2: амплитудно-фазовые характеристики и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; (в) — распределение количества (N) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком в зависимости от интенсивности

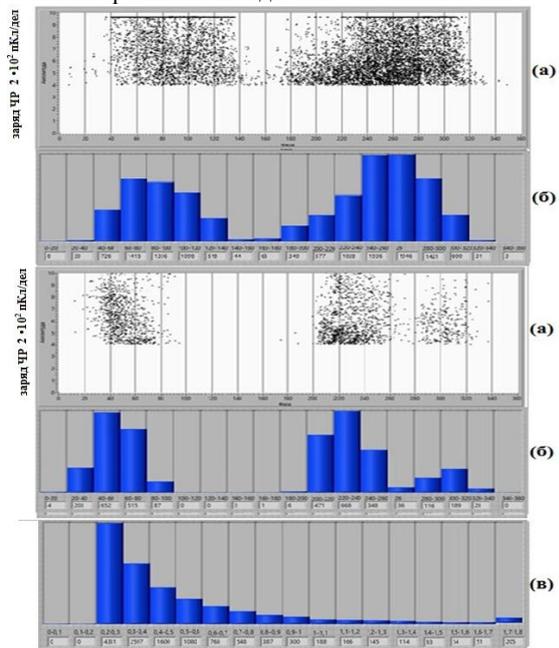


Рис. 3. Характеристики ЧР для неработоспособного дефектного изолятора № 6: амплитудно-фазовые характеристики и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; (в) — распределение количества (N) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком, в зависимости от интенсивности

Более углубленный анализ параметров характеристик ЧР показал возможность на их основе определять тип дефекта, и даже место его расположения. Как ранее было установлено [9; 10], для ФВИ наиболее характерны поверхностные трещины в диэлектрическом стержне и неплотные контакты между стержнем и фланцами (оконцевателями). В первом виде дефектов электрические пробои (перекрытия) возникают за счет повышения напряженности  $E$  в воздушном зазоре, по сравнению с напряженностью  $E_0$  в диэлектрике, определяемым как:

$$E/E_0 = \frac{\varepsilon}{d - (\varepsilon - 1) + 1},$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость фарфора;  $d$  – ширина зазора;  $d_0$  – длина диэлектрика. В реальных условиях размер зазора может изменяться в пределах от 1 до 20 мкм, а  $d_0$  – порядка 100 см и превышение,  $E/E_0$ , будет пропорционально  $\varepsilon$ .

Поскольку ЧР в основном возникают вследствие процессов ионизации воздушного зазора, то их появление определяется размерами трещины. Равномерное распределение числа и интенсивности ЧР в обоих полупериодах сети соответствует симметричности расположения поверхности зазора в приложенном поле, что вполне удовлетворяет характеристикам ЧР для двух первых групп ФВИ. Небольшая интенсивность ЧР вполне соответствует малым размерам трещин, которые незначительно влияют на электрофизическое состояние ФВИ.

Резкая фазовая асимметричность ряда характеристик ЧР, также как и значительно большая их интенсивность в третьей группе, позволила связать некоторые мощные ЧР с дефектами между стержнем и оконцевателем.

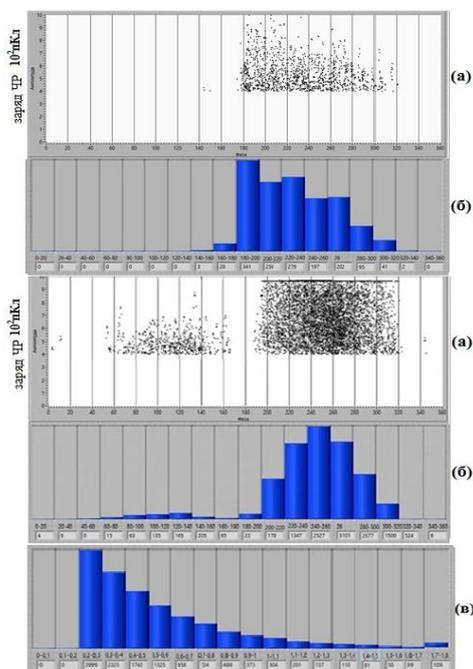


Рис. 4. Характеристики ЧР для неработоспособного, дефектного изолятора № 7 (корона): амплитудно-фазовые характеристики и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; (в) – распределение количества ( $N$ ) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком, в зависимости от интенсивности

Электрический пробой в этом дефекте, как это уже рассматривалось теоретически [7] и экспериментально [8] на модельных образцах, имеет более сложный вид, чем при поверхностном пробое трещины. В данном случае, пробой контакта, состоящего из электрода, зазора и стержня, происходит в воздушном зазоре за счет нормальной к зазору компоненты поля путем излучения электронов из электрода (катода). В результате электронной бомбардировки поверхности диэлектрического стержня на последней образуется индуцированное положительно заряженное поле ионов с плотностью до  $10^{-6}$ – $10^{-5}$  Кл/см, которое успевает изменить знак при изменении фазы приложенного напряжения на  $180^{\circ}$ . Таким образом, момент возникновения и интенсивность ЧР определяются знаком и напряженностями приложенного и индуцированного полей. Как показали расчёты и измерения, именно после перехода приложенного поля в отрицательную фазу возникает условие суммирования обоих полей, что сопровождается генерацией самых мощных ЧР. Интенсивность ЧР также зависит от площади и ширины зазора между электродом и диэлектрическим стержнем. Поскольку в условиях длительной эксплуатации эти параметры имеют случайный и неконтролируемый характер, то именно интенсивность и число несимметричных по фазовым полупериодам ЧР может определяться параметрами дефекта. Более того, при длительной эксплуатации подобного дефектного контакта вследствие электронно-тепловых процессов [11] происходит ускоренное старение и даже повреждение диэлектрика, что, в конечном итоге, снижает электрическую плотность изолятора.

### **Заключение**

Выполнено обследование серии фарфоровых высоковольтных изоляторов и разделение их на работоспособные и неработоспособные по предложенному набору характеристик ЧР. Не менее важной является возможность определения места расположения и вида ЧР. Дальнейшее усовершенствование метода возможно с дополнительным применением оптических и тепловизионных приборов нового поколения.

### **Литература**

1. Киншт Н.В., Петрунько Н.Н. Об оценке параметров частичных разрядов // *Электричество*. 2016. № 6.
2. Sasaki A., Kato S., Takahashi E. Simulation of discharge in insulating das from initial partial discharge to growth of a stepped leader using the percolation model // *Japan Jom. Appl. Phys.* 2016. V. 55, No. 2.
3. Martinez-Tariba J.M., Ardila-Rey J., Robles G. Partial discharge source recognition by means of clustering of spectral power ratios // *Meas. Science and Technol.* 2013, V. 24, No. 12.
4. ГОСТ Р 55191-2012. Методы испытаний высоким напряжением. Измерение частичных разрядов. М.: Стандартинформ, 2014.
5. Международный стандарт IEC 60060-1:2010 (NEQ). Методы испытаний высоким напряжением. Часть 1. Общие определения и требования к испытаниям. М.: Стандартинформ, 2010.
6. Диагностика технического состояния фарфоровых изоляторов высоковольтных коммуникационных аппаратов // *Рекомендации Всероссийского семинара*. М.: 27–29 октября 1999.
7. Способ бесконтактной диагностики высоковольтных полимерных изоляторов: пат. 2483315 Российская Федерация. МПК GOIR 31/12 / Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Евдокимов Л.И., Черномашенцев А.Ю.; опубл. 2013.
8. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Синюгин И.В., Хуснутдинов Р.А., Марданов Г.Д. Дистанционная диагностика высоковольтных полимерных изоляторов // *Проблемы энергетики*. 2014. № 7–8. С. 77–82.
9. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., Хуснутдинов Р.А., Марданов Г.Д. Комплексный метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2016. № 5–6. С. 87–93.
10. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1994.

11. Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и дистанционные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков // Екатеринбург: изд-во УрО РАН, 2000.

#### **Авторы публикации**

**Голенищев-Кутузов Александр Вадимович** — д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: alex.kutuzov@mail.ru.

**Голенищев-Кутузов Вадим Алексеевич** — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Иванов Дмитрий Алексеевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Марданов Георгий Дамирович** — магистр техники и технологий, аспирант кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

#### **References**

1. Kinsht N.V., Petrun'ko N.N. Ob otsenke parametrov chastichnykh razryadov // *Elektrichestvo*. 2016. No. 6.
2. Sasaki A., Kato S., Takahashi E. Simulation of discharge in insulating das from initial partial discharge to growth of a stepped leader using the percolation model // *Japan Jom. Appl. Phys.* 2016. V. 55, No. 2.
3. Martinez-Tariba J.M., Ardila-Rey J., Robles G. Partial discharge source recognition by means of clustering of spectral power ratios // *Meas. Science and Technol.* 2013, V. 24, No. 12.
4. GOST R 55191-2012. Metody ispytaniy vysokim napryazheniem. Izmerenie chastichnykh razryadov. M.: Standartinform, 2014.
5. Mezhdunarodnyi standart IEC 60060-1:2010 (NEQ). Metody ispytaniy vysokim napryazheniem. Chast' 1. Obshchie opredeleniya i trebovaniya k ispytaniyam. M.: Standartinform, 2010.
6. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya farforovykh izolyatorov vysokovol'tnykh kommunikatsionnykh apparatov // *Rekomendatsii Vserossiiskogo seminara*. M.: 27□29 oktyabrya 1999.
7. Sposob beskontaktnoi diagnostiki vysokovol'tnykh polimernykh izolyatorov: pat. 2483315 Rossiiskaya Federatsiya. MPK GOIR 31/12 / Golenishchev-Kutuzov V.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Evdokimov L.I., Chernomashentsev A.Yu.; opubl. 2013.
8. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Sinyugin I.V., Khusnutdinov R.A., Mardanov G.D. Distsionnaya diagnostika vysokovol'tnykh polimernykh izolyatorov // *Problemy energetiki*. 2014. № 7–8. S. 77□82.
9. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A., Khusnutdinov R.A., Mardanov G.D. Kompleksnyi metod distantsionnogo kontrolya sostoyaniya vysokovol'tnykh izolyatorov // *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2016. No. 5–6. P. 87–93.
10. Ushakov V.Ya. Izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya. M.: Energoatomizdat, 1994.
11. Vershinin Yu.N. Elektronno-teplovye i distantsionnye protsessy pri elektricheskom probe tverdykh dielektrikov // Екатеринбург: изд-во УрО РАН, 2000.

#### **Authors of the publication**

**Alexander V. Golenishchev-Kutuzov** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Industrial Electronics and Lighting Technology of Kazan State Power Engineering University. (420066,

©*A. B. Голенищев-Кутузов, В. А. Голенищев-Кутузов, Д. А. Иванов, Г. Д. Марданов*

Kazan, Krasnoselskaya St., 51) e-mail: alex.kutuzov@mail.ru

***Vadim A. Golenishev-Kutuzov*** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Industrial Electronics and Lighting Technology of the Kazan State Power Engineering University.

***Dmitriy A. Ivanov*** — Cand. Sci. (Technical), Assistant Professor of the Department of Industrial Electronics and Lighting Technology of the Kazan State Power Engineering University.

***George D. Mardanov*** — Master of Engineering and Technology, Graduate Student of the Department of Industrial Electronics and Lighting Technology of the Kazan State Power Engineering University.

***Поступила в редакцию***

***03 декабря 2017 года.***